

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЧМ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

А.В. Подлесный

Научный руководитель: д.ф.-м.н. В.И. Куркин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной  
физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН),

Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126-а, а/я 291, 664033

E-mail: [pav@iszf.irk.ru](mailto:pav@iszf.irk.ru)

Несмотря на важность миссий с системами ионосферного зондирования для изучения и диагностики околоземного космического пространства их было запущено сравнительно небольшое количество. Одной из причин этого является то, что из-за использования передатчиков мощностью несколько сотен ватт и большой антенной системы ионозонды являются одной из самых энергоёмких и крупных по массе и габаритам систем в составе исследовательских аппаратов. Вторая проблема – при работе ионозонда создаются сильные электромагнитные помехи остальной аппаратуре спутника, что приводит к невозможности проведения одновременных наблюдений на ряде инструментов. Тем не менее, спустя более полувека с момента запуска первых космических ионосферных миссий, в современной планирующейся к запуску космической системе «Ионосфера» за основу принципа построения бортовых ионозондов «ЛАЭРТ» взяты всё те же устаревшие принципы моноимпульсного зондирования. Справедливости ради надо отметить, что, например, при создании аппаратов «Алуэрт» в 1965 году рассматривался вопрос возможного использования непрерывных сигналов с линейной частотной модуляцией. Тогда отмечалось, что использование для зондирования сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ, сигналов с качающейся частотой и непрерывным излучением) в наземных двухпозиционных установках позволяет значительно снизить пиковые напряжения, получить высокое соотношение сигнал/шум и упростить схему выходного каскада усилителей ионозонда. Однако, реализация на практике преимуществ таких систем при проведении зондирования внешней ионосферы была признана невозможной. Ниже приводится список причин, по которым разработчики систем внешнего зондирования ионосферы того времени отказались от применения сигналов с линейной частотной модуляцией:

- сложность создания компактных генераторов сигналов с линейной частотной модуляцией;
- большие погрешности измерений дальности из-за доплеровских сдвигов;
- большая длительность цикла зондирования из-за низкой скорости перестройки частоты;
- необходимость применения антенных переключателей из-за невозможности обеспечения одновременной работы приёмника и передатчика приводящая к импульсному режиму работы;
- сложность построения компактной системы предварительного анализа данных и подготовки к передаче их по телеметрическим каналам[1].

Хотя от установки системы с ЛЧМ на спутник отказались, развитие наземной аппаратуры такого типа продолжилось. В частности, в настоящее время в азиатской части России действует сеть ЛЧМ зондирования ионосферы, принадлежащая ИСЗФ СО РАН [2]. Данная сеть состоит из системы наклонных трасс протяжённостью 2000-3000 км, одной слабонаклонной трассы протяжённостью 120 км и многофункционального ионозонда вертикального зондирования ионосферы непрерывными ЛЧМ сигналами. В контексте данной работы наибольший интерес представляет именно ионозонд вертикального зондирования ионосферы непрерывными ЛЧМ сигналами, который является уникальной разработкой, не имеющей аналогов в России и мире.

Ионозонд отличается возможностью работы в режиме сверхбыстрого зондирования (2-10 с), что позволяет наблюдать динамику быстрых процессов в ионосфере и минимизировать время активного излучения в режиме мониторинга. Ионозонд представляет собой прекрасную базу для развития методик ЛЧМ зондирования. В частности, были исследованы возможности

проведения ЛЧМ зондирования ионосферы на скоростях перестройки частоты вплоть до 4 МГц/с. То есть частотный диапазон шириной в 15 МГц возможно сканировать всего за 4 секунды существенно повышая временное разрешение даже по сравнению с установкой импульсного зондирования, а в случае со спутниковым аппаратом еще и пространственное разрешение по горизонтали. Использование таких скоростей нетривиальная задача, которая потребовала создания методики коррекции фазовых искажений ЛЧМ сигналов, позволившей существенно улучшить подавление сосредоточенных помех различного происхождения ещё на этапе работы во временной области [3].

Повышенная скорость сканирования линейно уменьшает неизбежные ошибки определения дальности, вызванные доплеровскими сдвигами частоты. Дело в том, что в ЛЧМ дальность определяется по разности частот между опорным и пришедшим сигналом, поэтому доплеровские сдвиги частоты дают паразитный вклад в получаемое значение дальности. Например, при частоте зондирования, равной 10 МГц, и редком, но наблюдаемом случае, когда компонента скорости вдоль пути луча равна скорости космического аппарата (~9 км/с), доплеровский сдвиг составит  $\pm 300$  Гц. При скорости перестройки частоты 4 МГц/с, ошибка будет составлять не более 22.5 км, оставаясь в абсолютном большинстве случаев меньше величины отсчёта по дальности, который обычно составляет 10 км. При увеличении скорости зондирования, например, до 15 МГц/с время на сканирование диапазона частот составит 1 секунду, а максимальный размер ошибки из-за паразитного вклада доплеровских сдвигов составит всего 6 км.

Обеспечение одновременной работы приёмника и передатчика на близкорасположенные антенны вполне возможно, учитывая, что даже в наземных установках для развязки приёмника и передатчика достаточно применения отдельных антенн и то, что по опыту эксплуатации импульсных ионозондов требуемая мощность сигнала для зондирования сверху меньше в 100 раз, чем для наземных установок. Примем расчётный уровень мощности для передатчика ионозонда космического базирования 0.1 Вт (+20 дБм). Если развязка между приёмными и передающими антеннами составит 20 дБ, действующее значение напряжения на приёмных антеннах будет около 200 милливольт, что укладывается в шкалу существующих быстродействующих АЦП.

Основой обработки данных ЛЧМ ионозонда являются банки фильтров, в качестве которых в настоящее время широко применяется БПФ. Выполнение БПФ на специализированных процессорах цифровой обработки происходит очень быстро, поэтому с компактностью и быстродействием бортовых систем обработки получаемых сигналов в настоящее время проблем тоже нет. В то же время использование программно-определяемых радиосистем в настоящее время позволяет быстро и без существенного усложнения реализовывать формирование и приём любых видов модуляции.

Как видно из изложенного материала, на современном этапе развития элементной базы все основные препятствия для использования сложных сигналов на спутниковых ионозондах потеряли свою актуальность, сохранив при этом возможные преимущества от их использования, поэтому в ближайшем будущем следует ожидать большого количества проектов по разработке и развитию таких установок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J.E. Jackson, E.S. Warren Objectives, history, and principal achievements of the topside sounder and ISIS programs// Proceedings of the IEEE, Volume: 57, Ио 6, June 1969, pp. 861-865
2. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселёв А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы // ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫПУСК 4, 24–31, 2013 ТЕХНОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
3. Подлесный А.В., Лебедев В.П., Ильин Н.В., Хахинов В.В. Реализация метода восстановления передаточной функции ионосферного радиоканала по результатам зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 1. С. 063-070.